

# VDG - MERKBLATT

## Verbesserung der Lebensdauer von Glocken

A 600 E

Juli 2002

Einspruchsfrist: 01. Februar 2003

### Vorwort

Diese gemeinsam vom Verein Deutscher Gießereifachleute, dem Verband Deutscher Glockengießereien und dem Beratungsausschuß für das Deutsche Glockenwesen erstellte Richtlinie basiert auf Untersuchungen, die vom Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, LBF, Darmstadt, in den Jahren 1998/99 durchgeführt wurden. Ziel des Projektes war vornehmlich die Bestimmung der die Lebensdauer maßgeblich bestimmenden Einflußgrößen und die Übertragung der Ergebnisse auf denkmalrelevante Glocken. Diese Untersuchungen wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen gefördert. Auftraggeber für das FuE-Projekt „Bestimmung von Einflußgrößen auf die Lebensdauer von Glocken“ war der Fachausschuß Kupfergußwerkstoffe des Vereins Deutscher Gießereifachleute.

### 1 Geltungsbereich

Dieses Merkblatt gilt für

- Glocken von kulturhistorischem Wert
- rißgefährdete, rißfreie Glocken (geprüft mittels Klang-, Sichtprobe)
- ausgeschlagene Glocken

### 2 Schadensfälle von Glocken

Als Lebensdauer einer Glocke wird in aller Regel die bis zu einem Schaden verstrichene

Vom Verein Deutscher Giessereifachleute (VDG), des Verbandes Deutscher Glockengießereien und des Beratungsausschusses für das Deutsche Glockenwesen erstellte Richtlinie

Zeit verstanden. Diese Definition ist allerdings solange nicht eindeutig, wie unterschiedliche Auffassungen über das, was man unter „Schaden“ verstehen soll, existieren. Zum Beispiel wäre ein Materialabtrag im Bereich der Schlagstellen ohne Beeinträchtigung des Gefüges im Sinne der Dauerfestigkeit solange kein Schaden, wie die Beanspruchungen unterhalb eines bestimmten Grenzwertes liegen, wohingegen die damit verbundene Veränderung des Klangbildes in musikalischer Hinsicht sehr wohl ein Schaden ist. In dieser Untersuchung wird deshalb unter „Schaden“ jede Beeinträchtigung der „Gebrauchstüchtigkeit“ verstanden.

Schon seit längerem besteht Übereinstimmung darin, daß Glocken, die seinerzeit wegen Materialknappheit oder aus Kostengründen aus Ersatzmaterial hergestellt wurden<sup>1</sup>, neben geringerer Klangqualität auch eine geringere Lebensdauer aufweisen als solche aus der traditionellen Kupfer-Zinn-Legierung<sup>2</sup>. Diese Untersuchung beschränkt sich deshalb auf Glocken aus Zinnbronze.

Die an solchen Glocken beobachteten Schäden sind vielfältiger Natur; die folgende Zusammenstellung liefert einen Überblick über die am häufigsten auftretenden:

Endnoten siehe Seite 11

Fortsetzung Seite 2 bis 12



VEREIN DEUTSCHER GIESSEREIFACHLEUTE



| Schaden   | Schadensursache  |
|---|--|
| Ausgeschlagene Stellen                              | Anschlag von Uhrhammer und/oder Klöppel.<br>Je nach Klöppelaufhängung und Klöppelform ist die ausgeschlagene Stelle rund oder stark elliptisch.  |
| Risse im Bereich einer Kontaktfläche Klöppel/Glocke | Beanspruchung durch lokale Zerrüttung.   |
| Risse außerhalb von Kontaktflächen                  | zu hohe Beanspruchung durch Schwingungen; dies wird u. U. gefördert durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gußfehlstellen (Lunker und Gasblasen) verursacht z. B. durch Lehm oder sonstige Beimischungen,</li> <li>• ungünstig verlaufene Abkühlprozesse bei der Herstellung verbunden mit Seigerungen,</li> <li>• unterschiedliche Legierungsbestandteile, wegen des großen Erstarrungsbereichs besteht Seigerungsgefahr.</li> </ul> |
| Risse im Glockenkörper                              | bei Bränden und Löschmaßnahmen (Thermoschock).   |
| Risse und Brüche im Kronenbereich                   | Neben herstellungsbedingten Ursachen auch hohe Beanspruchungen infolge der Aufhängung, speziell bei gekröpften Aufhängungen zur Verringerung der Turmbeanspruchungen.  |
| Zerlegung der Glocke in mehrere Bruchstücke         | Absturz vom Turm.  |

Es läßt sich jedoch sagen, daß durch die bessere Organisation des deutschen Glockenwesens und häufigere Inspektionen das Auftreten von „klassischen“ Rissen des Glockenkörpers insgesamt geringer geworden ist. Weiterhin können auch Schäden im Kronenbereich sowie ausgeschlagene Stellen ohne äußerlich sichtbare Risse auftreten, denen besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist.

### 3 Der Werkstoff Glockenbronze

Als »Glockenbronze« wird heute eine 20-22%ige Zinnbronze (Rest Cu) bezeichnet, wobei max. 2,0% andere Bestandteile (davon 1,0% Blei) in Kauf genommen werden. Die Legierung ist nur schwer homogenisierbar. Zinngehalte über 13% bringen eher Nachteile im Hinblick auf die Festigkeits- und Dehnungswerte, sie steigern jedoch die Härte.

Mit den im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen an speziell angefertigten Probekörpern sollte die Möglichkeit eröffnet werden, die Schwingfestigkeit von Bauteilen aus diesem Werkstoff abschätzen zu können. Die Methodik hierzu hat, besonders bei ferritischen Werkstoffen, eine hohe Zuverlässigkeit erreicht. Zu dem beim Glocken-

kenguß verwendeten Material gibt es keine Arbeiten zur Schwingfestigkeit<sup>3</sup>, so daß sich die Gültigkeit der im folgenden gemachten Aussagen auf die diesen Untersuchungen zugrunde liegende Legierung - wie sie auch heute zur Herstellung der Glocken gewöhnlich verwendet wird - beschränkt. Nun variieren ganz besonders bei alten Glocken die Legierungsbestandteile stark, und da sich die Festigkeitseigenschaften einer Legierung nicht aus den Einzeleigenschaften der Komponenten voraussagen, geschweige denn quantitativ berechnen lassen, ist dies bei jeder Glocke im Einzelfall zu berücksichtigen.

#### 3.1 Mechanische Eigenschaften

Zum besseren Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen wird auf Bild 1 und Bild 2 verwiesen, aus denen hervorgeht, daß bereits geringe Änderungen der Zusammensetzung, der Abkühlbedingungen und der Wärmehandhabung deutliche Änderungen der mechanischen Eigenschaften zur Folge haben.

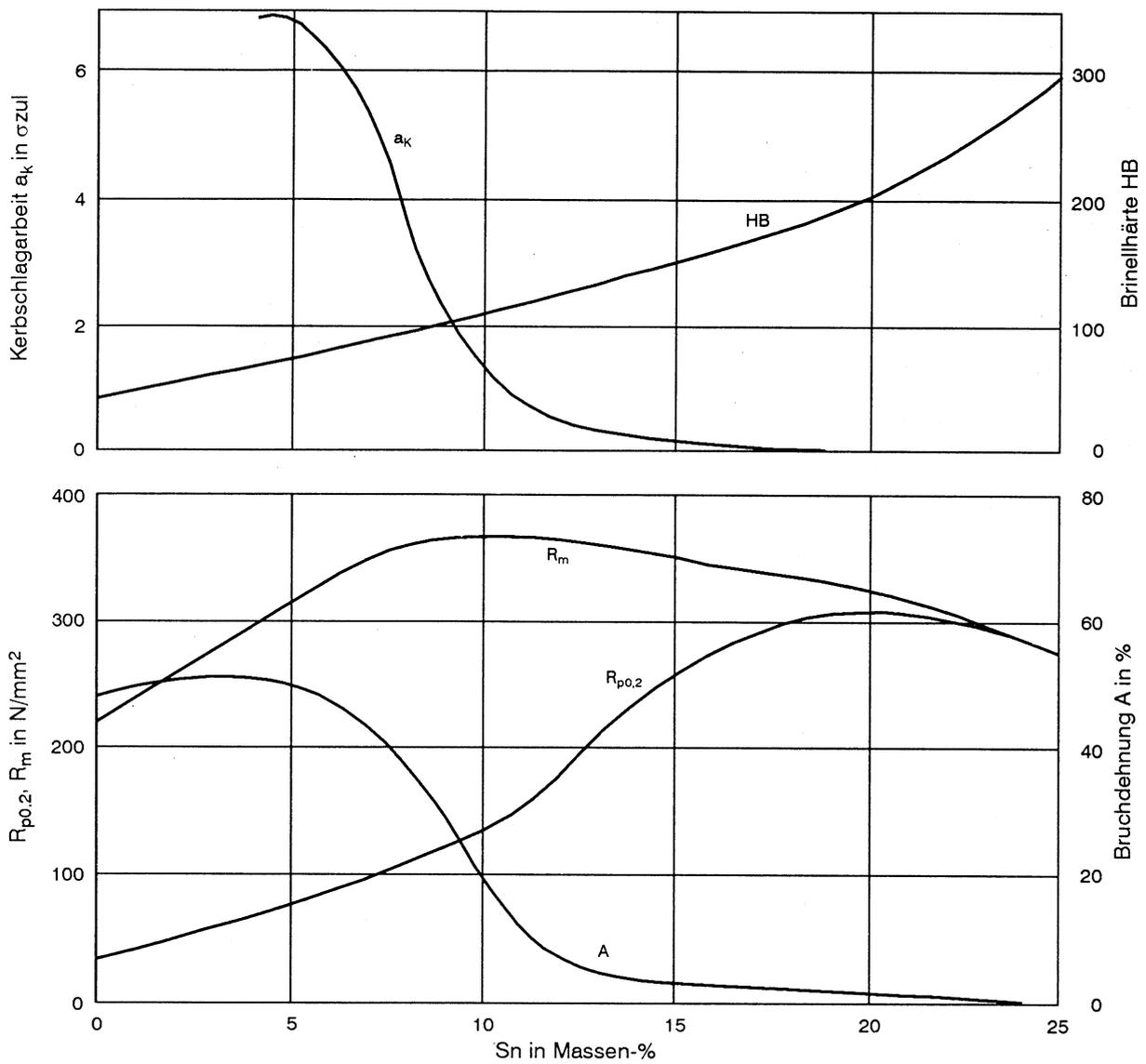


Bild 1 Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur von Guß-Zinnbronzen (Kokillenguß) vom Zinngehalt (nach Landolt-Börnstein)

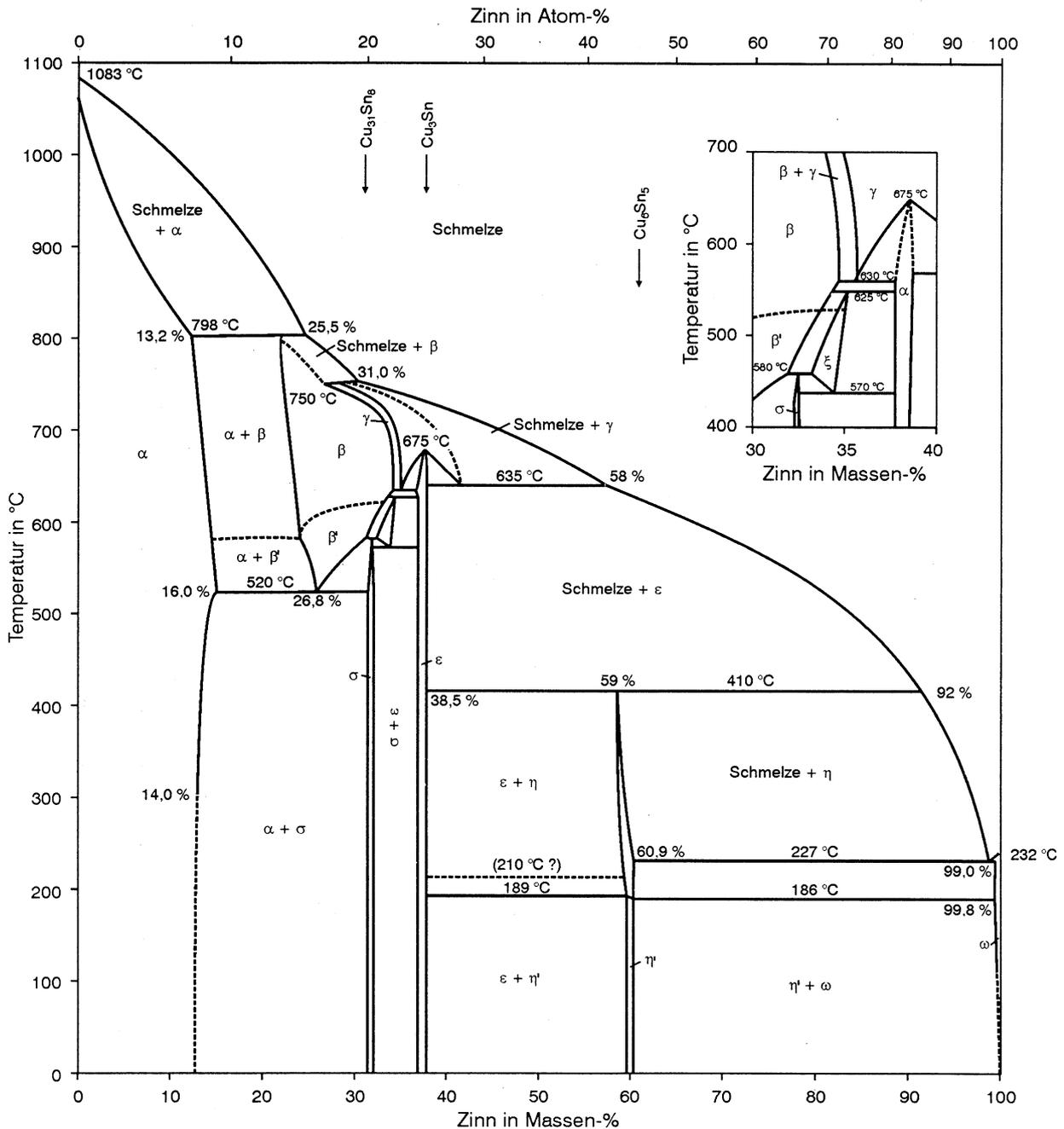


Bild 2 Zustandsdiagramm Kupfer-Zinn (nach Taschenbuch für Chemiker und Physiker)

### 3.2 Verschleiß

Bei der dynamischen Beanspruchung der Glocke durch den aufprallenden Klöppel kommt es in den Oberflächenbereichen der Glockenbronze zu mikrostrukturellen Veränderungen, die einen Prall- bzw. Stoßverschleiß zur Folge haben. Man unterscheidet

im wesentlichen zwei Verschleißmechanismen:

die Oberflächenzerrüttung, bei der es zu Rißbildung und -wachstum bis zur Entfernung von Verschleißpartikeln kommt, wobei häufig Grübchen und Löcher zurückbleiben, und

die Adhäsion. Hier werden in der Kontaktfläche der sich berührenden Körper atomare Bindungen (Mikroverschweißungen) gebildet und wieder getrennt. Dabei erfolgt die Trennung häufig nicht in der ursprünglichen Kontaktfläche, sondern im Volumen der Glocke. Es haftet dann Material an dem Klöppel. Diese Erscheinung wird auch als Materialübertrag bezeichnet.

Häufig werden die beanspruchten Oberflächenbereiche stark aufgeraut. Es kommt neben dem Materialübertrag zu Fressern, Löchern, Kuppen und Schuppen. Der Bildung von Verschleißpartikeln geht i.a. eine Inkubationsperiode voraus, in der kein Verschleiß meßbar ist.

### 3.3 Versuche an Probekörpern aus Glockenbronze

Aus einem Bruchstück einer Glocke wurden Probekörper durch spanende Bearbeitung herausgearbeitet. Die Lage des Bruchstücks innerhalb der Glocke und die Lage der daraus gefertigten und mit einer fortlaufenden Numerierung versehenen Proben ist im LBF-Bericht <sup>1</sup> ausführlich beschrieben.

Bei Vorversuchen wurde festgestellt, daß die Proben eine Dehnung von  $\pm 0.75\%$  etwa  $10^5$  mal bis zum Bruch ertragen. Deshalb wurden die meisten der Schwingfestigkeitsversuche in diesem Dehnungsbereich durchgeführt. Die Belastungsfrequenz betrug 10 Hz: aufgezeichnet wurde alle Minute für jeweils 1 s die Kraft und die Gesamtdehnung. Folgende Parameter wurden variiert:

Belastungsart: Zug/Druck und Biegung

Temperatur: Raumtemperatur und  $-20^\circ\text{C}$

Vorschädigung: einige Proben wurden vorgeschädigt (mit Kugeleindruck und unterschiedlicher Anzahl von definierten Fallhammeranschlägen).

Die Ergebnisse der Einstufenversuche lassen sich in Form einer Wöhlerlinie (ertragene Beanspruchung über der Lastwechselanzahl) darstellen (Bild 4). Danach beträgt der Mittelwert der Lastspielzahl bis zum Anriß und die Streuspanne zwischen den Überlebenswahrscheinlichkeiten von 10% und 90%

$$N_{50\%} \approx 0.8 \cdot 10^5 \text{ und } T_N = 1 : \frac{N_{10}}{N_{90}} \approx 1 : 25.$$

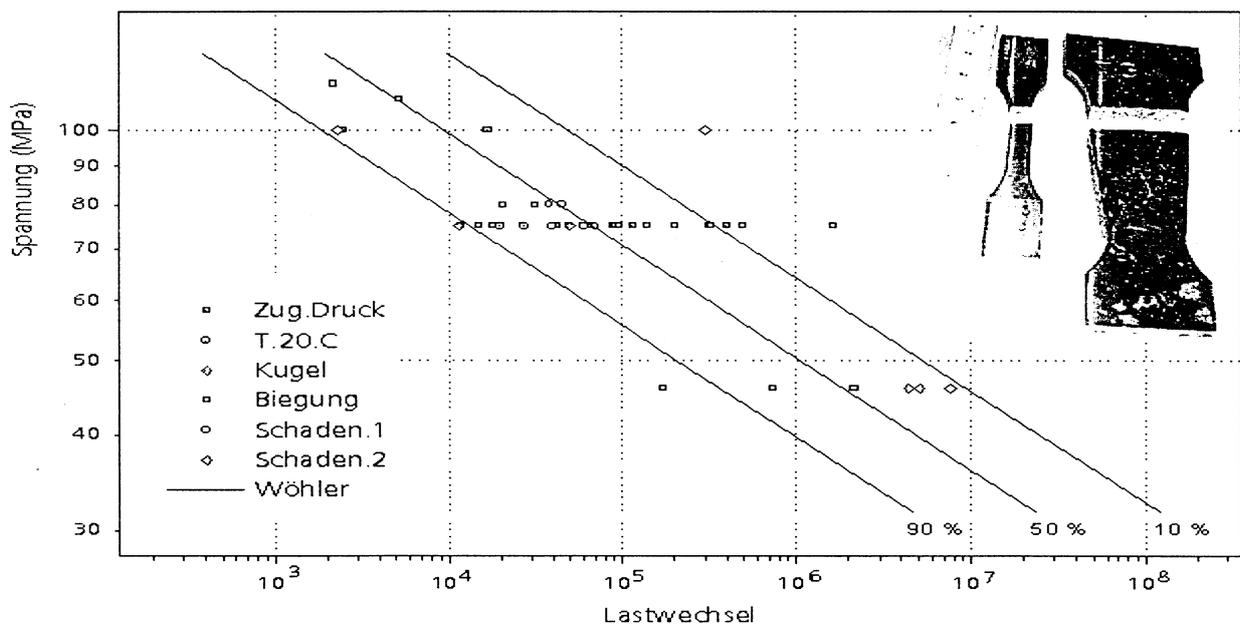


Bild 3 Ergebnisse von Einstufenversuchen an Probekörpern aus Glockenbronze

Die hohen Streuungen sind z. T. mit den Gasblasen im großen Meßquerschnitt 4 x 5 mm zu erklären, die zufällig an der Oberfläche oder den Kanten liegen und damit lokal unterschiedliche Beanspruchungsgradienten erzeugen, die zu einer früheren oder späteren Rißeinleitung führen.

Die Ergebnisse der Probenversuche wurden daraufhin untersucht, inwieweit die variierten Parameter einen Einfluß auf die Probenlebensdauer haben. Neben der Tatsache, daß die Entnahmestelle der Proben (innen, Mitte, außen) keinen signifikanten Einfluß auf die Lebensdauer hat, ist hier auch schon bei oberflächlicher Betrachtung zu erkennen, daß sich weder die bei tieferen Temperaturen erreichten Versuchsergebnisse noch die der vorschädigten Proben aus dem Gesamtergebnis herausheben. Dieses Ergebnis wird im Bericht mit einer linearen Regressionsanalyse auch statistisch belegt.

#### 4 Versuche an einer Glocke

Zahlreiche Läuteversuche sind an einer etwa 1.5 t schweren Glocke durchgeführt worden und die dabei induzierten Beanspruchungen (Dehnungen und Beschleunigungen) an 34 Positionen der Glocke erfaßt worden. Um die Aufstellung eines geeigneten Versuchsplans zu erleichtern, sind mehrere Vorversuche durchgeführt worden, die die Zusammenhänge zwischen den Beanspruchungen der Glocke und den Beschleunigungen des Klöppels selbst bzw. den Beschleunigungen im Bereich der Aufschlagstelle klären sollten. Im Ergebnis konnte der folgende Versuchsplan erstellt werden.

Um eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten, müssen die Versuchsbedingungen konstant gehalten werden. Dies gestaltet sich bei einem „normalen“ Läuten als recht schwierig, da die das Läuten beeinflussenden Parameter Rückwirkungen haben, also z.B. die Zahl der Schläge oder die Stärke des Klöppelaufpralls auf die Glocke den Ablauf des Läutens beeinflussen. In dieser Untersuchung wurde dieses Problem dadurch umgangen, daß mit dem Ein- und Ausschalten der Läutemaschine ein bestimmter „Läutevorgang“ definiert wurde und die Versuche jeweils wiederholt wurden. Da wegen der begrenzten Meßaufzeichnungskapazität die

Versuche ohnehin in zwei Blöcken durchgeführt werden mußten, bedeutet dies, daß für jede Parameterkombination jeweils mindestens vier „Läutevorgänge“ erfaßt wurden.

Generell besteht ein „Läutevorgang“ aus drei Abschnitten:

dem Anfahrvorgang, bzw. Anläuten  
dem eigentlichen Läuten und  
dem Ausklingvorgang.

Vorversuche haben gezeigt, daß innerhalb eines Läutevorganges von insgesamt einer Minute Dauer eine realistische Glockenbeanspruchung simuliert und für Parameterstudien verwendet werden konnte.

Den Versuchen liegt deshalb die folgende Definition bzw. Läuteanweisung zugrunde:

»Ein Läutevorgang beginnt mit der ersten hörbaren Berührung von Glocke und Klöppel. Von diesem definierten und in den Meßdaten exakt zu bestimmenden Zeitpunkt an gerechnet wird die Läutemaschine nach genau 60 Sek. ausgeschaltet. Die Aufzeichnungsdauer wird so gewählt, daß alle Daten innerhalb 5 Sek. vor dem ersten Schlag und der gesamte Ausklingvorgang erfaßt werden.«

#### Untersuchte Parameter

Als wichtigste Einflußgrößen auf die Beanspruchung einer Glocke wurden ausgewählt:

Klöppelform: Klöppel mit Ellipsoidkugel (4-Kant-runder Schwung) und Klöppel mit kleinerem Krümmungsradius (8-Kant-Schwung).

Klöppelmasse: An dem Klöppel wurde unterhalb des Klöppelballens eine Zusatzmasse von 4 kg Gewicht angebracht.

Läutewinkel: Der Läutewinkel wird durch die Einstellung der Läutemaschine beeinflusst; der tatsächlich erreichte Läutewinkel, d.i. der während eines Läutevorganges maximal aufgetretene Ausschlag der Glocke, wurde durch einen Schleppzeiger erfaßt. Der Läutewinkel wurde im Bereich zwischen 40° und 68° variiert.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Bild 5 und Bild 6 dargestellt. Danach kann durch das Drehen der Glocke eine gleichmäßigere Schädigung über dem Glockenumfang erreicht werden. Ein Drehen um Vielfache von  $60^\circ$  verringert die Schädigung um mehr als 50%, das Drehen um Vielfache von  $30^\circ$  sorgt dann für eine gleichmäßige Schädigung aller Umfangspunkte, die im günstigsten Fall um den Faktor 3 unterhalb der Schädigung liegt, die sich im Bereich der Anschlagstelle der nichtgedrehten Glocke einstellt. Hiermit ist gleichzeitig die Grenze erreicht, d. h. die gün-

stige Wirkung des Umhängens der Glocke kann durch Drehen um andere (kleinere) Winkel nicht weiter gesteigert werden.

Dieses Ergebnis kann man in Beziehung zu der Schädigung der durch die Variation der anderen Parameter (Läutewinkel, Klöppelform etc.) zu erreichenden Wirkung setzen. Danach entspricht die Wirkung eines optimalen Umhängens der Glocke etwa jener, die durch die Verringerung des Läutewinkels um etwa  $9^\circ$  erreicht wird.

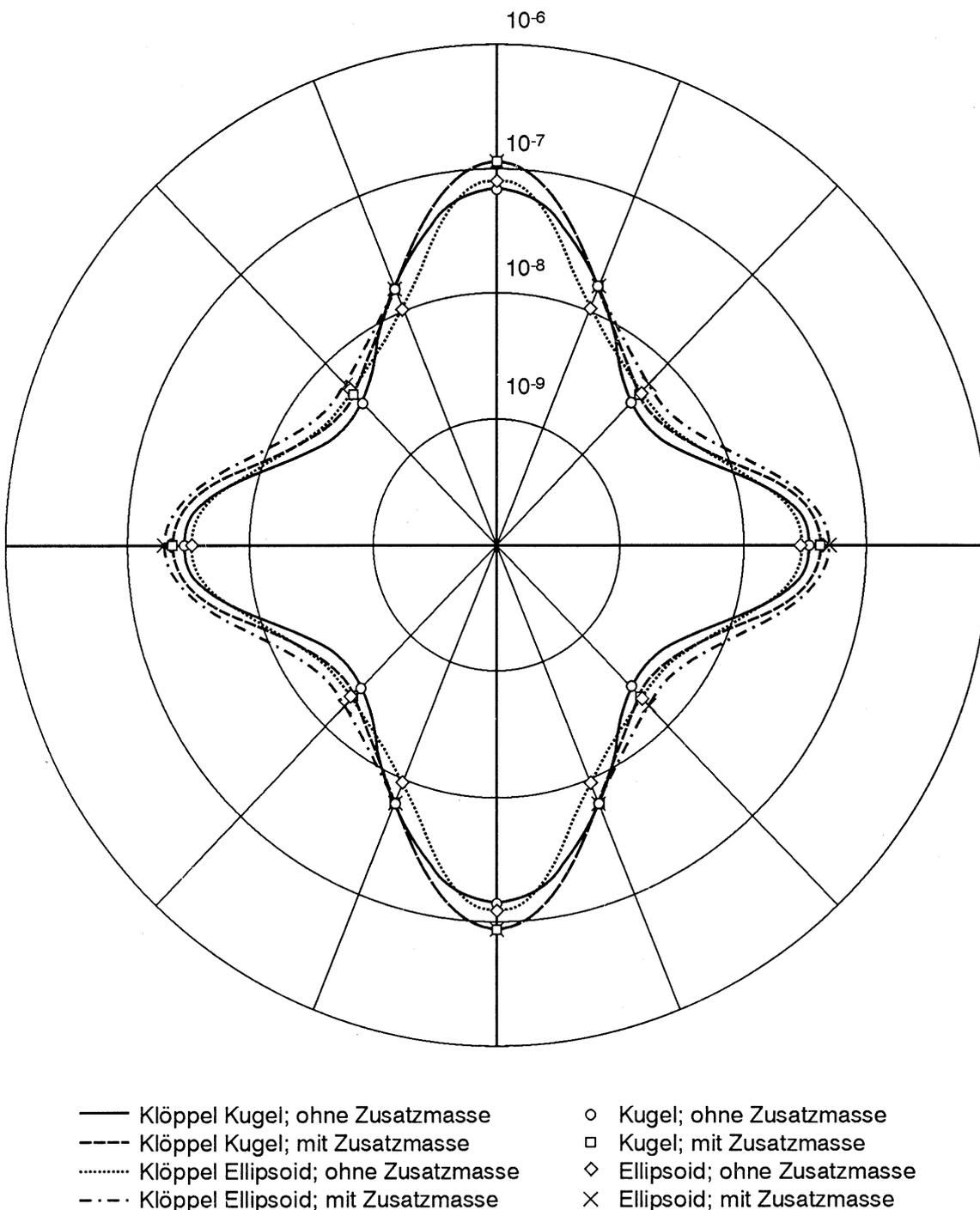


Bild 4 Mittlere Schädigung entlang des unteren Glockenrandes

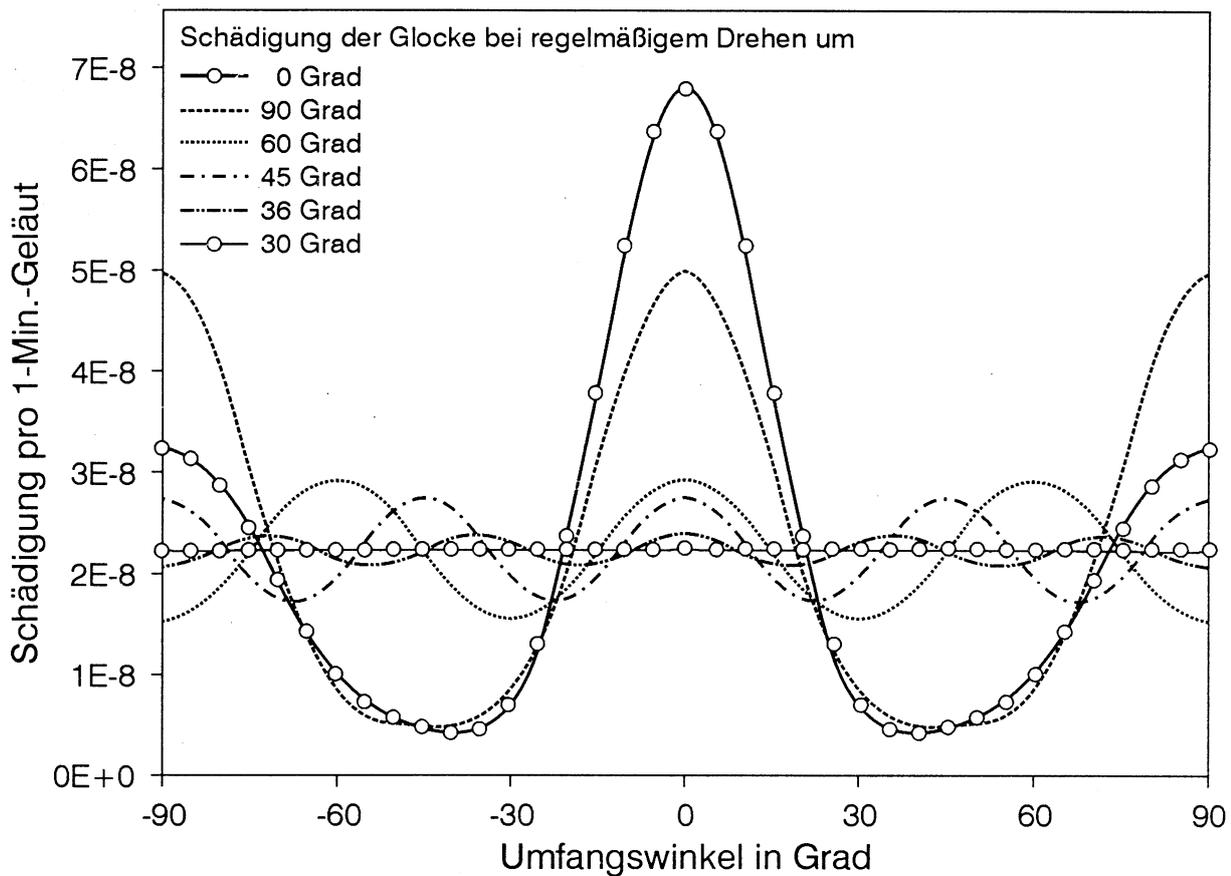


Bild 5 Mittlere Schädigung eines 1-Min.-Geläuts beim Drehen der Glocke um verschiedene Winkelfolgen

## 5 Berechnungen

Die numerische Simulation der Glockenbeanspruchung erfolgte mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Die Glocke wurde mit 20-knotigen Volumenelementen ohne Ausnutzung von Symmetrien abgebildet. Das Modell

verfügt insgesamt über 22100 Freiheitsgrade und 1350 Elemente. Es wurde ein linear-elastisches Werkstoffgesetz mit dem oben identifizierten E-Modul  $E = 98.600 \text{ MPa}$  und einer Querkontraktion von  $\nu = 0.3$  verwendet. In diesem Modell können die Beanspruchungen infolge eines Klöppelschlages genügend genau nachgebildet werden, wie ein Vergleich der Rechen- mit den Messergebnissen zeigt (Bild 7).

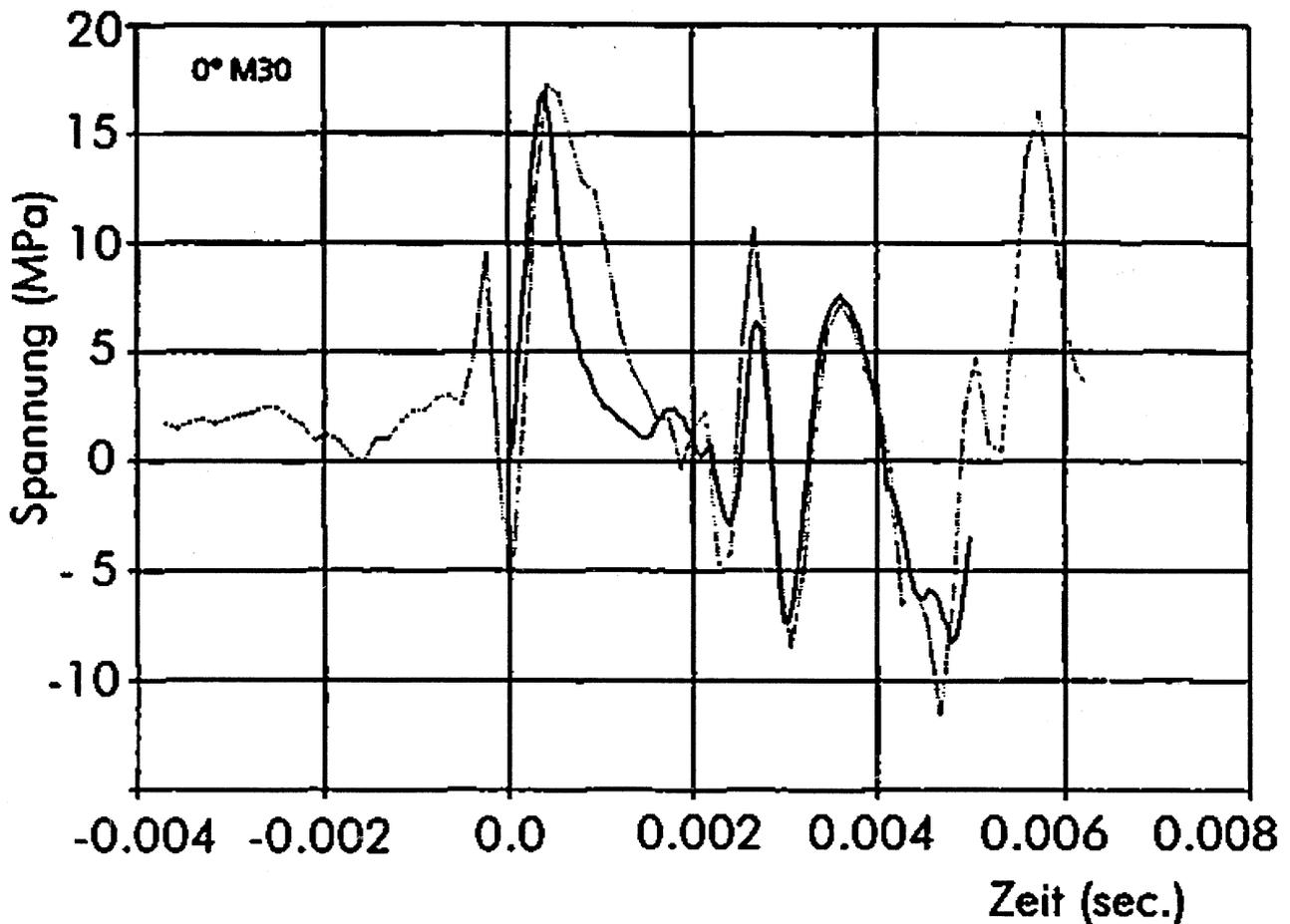


Bild 6 Spannungsverlauf: ..... gemessen, ----- gerechnet

## 6 Lebensdauerabschätzung

Die innerhalb dieses Projektes erhaltenen Ergebnisse gestatten es abzuschätzen, inwieweit die beim normalen Läuten auftretenden Beanspruchungen bezüglich der zu erwartenden Lebensdauer zu bewerten sind.

Für eine grobe Abschätzung kann man sich bei den Belastungen zunächst auf die maximale Beanspruchung zwischen Klöppel und Glockenkörper beschränken, also z.B. eine Beanspruchung von 35 MPa bei einem Läutewinkel von 55°. Der Wöhlerlinie entnimmt man, daß eine solche Beanspruchung im Mittel etwa  $10^7$  mal ertragen werden kann.

Setzt man einen mittleren Läutevorgang mit 10 min Dauer an (also mit etwa 600 Klöppelschlägen), so kommt man im Mittel auf insgesamt fast 17.000 ertragbare Läutevorgänge (etwa 45 Jahre bei 1 Läutvorgang/Tag). Diese Zahlen müssen jedoch relativiert werden:

- Bei der Forderung einer höheren Überlebenswahrscheinlichkeit (also z.B. anstelle der 50% eine solche von 90%) würde sich die Zahl der ertragbaren Läutevorgänge um etwa den Faktor 5 erniedrigen.
- Die Wöhlerlinie wurde für das Spannungsverhältnis  $R=-1$  ermittelt und die Übertragung auf die beim Läuten herrschenden Verhältnisse ( $R=-\infty$ , reine Druckbeanspruchung) ist nicht ohne weiteres möglich. Man kann jedoch davon ausgehen, daß Druckbeanspruchungen im Vergleich zu Zugbeanspruchungen eine wesentlich geringere Schädigung hervorrufen und damit Lebensdauerberechnungen auf dieser Basis die tatsächliche Lebensdauer in der Regel unterschätzen.
- Weiterhin ist die Annahme, daß Proben die gleiche Schwingfestigkeit haben wie ein ganzes Bauteil (hier die Glocke), nicht unbedingt zutreffend: wenn es infolge lokaler Schädigungen zu veränder-

ten Lastweiterleitungen kommt und dadurch die geschädigte Stelle entlastet wird, ist mit deutlich höheren Bauteillebensdauern im Vergleich zu den Probenlebensdauern zu rechnen.

Insgesamt läßt sich aber feststellen, daß sowohl die Ergebnisse der Probenversuche als auch die der Läuteversuche und der Berechnungen übereinstimmen und auch nicht im Widerspruch zu den in Wirklichkeit zu beobachtenden Läutevorgängen stehen. Es zeigt sich aber auch, daß die durch die Läutevorgänge akkumulierten Schädigungen nicht so klein sind, daß sie vernachlässigt werden dürften.

Experimentelle Untersuchungen an anderen Glocken wegen bereits eingetretener bzw. reparierter Schäden, darunter der Gloriosa in Erfurt, haben ergeben, daß die dort beim Läuten erzielten Beanspruchungen (Dehnungen an der höchstbeanspruchten Stelle) um den Faktor 1.5 bis 2 höher lagen, als bei den Untersuchungen im LBF und somit die Ergebnisse der VDG-Untersuchung bestätigen (wegen der dort eingetretenen Schäden). Hieraus folgt weiterhin, daß eine zuverlässige Abschätzung der Restlebensdauer erst nach einer eingehenden Zustandsanalyse der Glocke gemacht werden kann, bei der Risse und sonstige Schäden entsprechend berücksichtigt werden müssen. Andernfalls könnte es geschehen, daß bereits geschädigte Bereiche in Zonen höherer Beanspruchung gelangen und damit zu einer Verkürzung der Restlebensdauer führen. Die Zuverlässigkeit einer Restlebensdauerabschätzung ließe sich dabei auf der Basis einer Dehnungsmessung an den jeweiligen Außenseiten der Klöppelanschlagpunkte deutlich erhöhen.

## **7 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse**

Durch Gegenüberstellung der experimentell und rechnerisch ermittelten Beanspruchungen mit der in Versuchen ermittelten Schwingfestigkeit anhand von Schädigungsrechnungen konnte der Einfluß der variierten Parameter auf die Lebensdauer quantifiziert und eine Bewertung der Auswirkungen des Drehens von Glocken unter Berücksichtigung von durch den Klöppel ausgeschlagenen Stellen abgeleitet werden. Die rechnerische Simulation des Läutens wurde einerseits

durch eine Klanganalyse und Vergleich von Rechnung sowie Messung verifiziert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die statischen Festigkeitskennwerte der einer normalen Glocke entnommenen Probekörper liegen deutlich niedriger als die in der Literatur angegeben. Dies kann auf die Poren der vergossenen Bronze zurückgeführt werden.
- Die Streuungen der Probenversuchsergebnisse zur Lebensdauer lagen mit  $T_N \approx 1:25$  recht hoch; auch dieses Ergebnis hängt mit der Porosität des Werkstoffs zusammen.
- Eine Vorschädigung der Proben aus Glockenbronze durch Hämmern und das Aufbringen eines Kalotteneindrucks führte nicht zu einer signifikant niedrigeren Lebensdauer dieser Proben. Weiterhin zeigten Finite-Elemente-Berechnungen der gesamten Glocke, daß eine Verringerung der Schlagringdicke lokal begrenzt auf den Klöppelanschlagbereich um etwa 15% zu keiner wesentlichen Reduzierung der rechnerischen Beanspruchung und damit der Schwingfestigkeit geführt hat. Dieses Ergebnis kann demnach auf eine nicht darüber hinaus geschädigte Glocke übertragen werden.
- Versuchstemperaturen von  $-20^\circ\text{C}$  führten ebenfalls nicht zu einer signifikant niedrigeren Lebensdauer der Proben. Übertragen auf die Verhältnisse einer ungeschädigten Glocke heißt dies, daß Temperaturen in dieser Größenordnung keine Reduzierung der Schwingfestigkeit zur Folge haben.
- Die Belastungsarten Zug/Druck und Biegung führten bei den Probenversuchen zu vergleichbaren Wöhlerlinien, so daß bei Lebensdauerabschätzungen für Glocke in dieser Hinsicht keine Unterscheidung erforderlich ist.
- Bei den Läuteversuchen wurden die Parameter „Klöppelform“, „Klöppelgewicht“ und „Läutewinkel“ (Untersuchungsbereich  $\pm 40^\circ$ - $66^\circ$ ) variiert. Von diesen Parametern hat nur der Läutewinkel einen größeren Einfluß auf die Schädigung: sie wird pro Grad Läutewinkelsteigerung um ca. 14% erhöht bzw. die Lebensdauer entsprechend verkürzt.

- Die Beanspruchung des Glockenkörpers beim Läuten ist entlang des Umfanges nicht gleichmäßig; Maxima treten an den Schlagstellen und bei 90° auf.
- Ein Drehen der Glocke sorgt für eine gleichmäßigere Beanspruchung aller Bereiche in Umfangsrichtung. Im günstigsten Fall (bei Drehung um Vielfache von 30°) kann die Schädigung um den Faktor 3 reduziert werden, d.h. daß durch diese Maßnahme die Lebensdauer entsprechend erhöht werden kann. Die gleiche Wirkung könnte mit einer Lätewinkelverringern von etwa 10° erreicht werden.
- Ein Drehen der Glocke und eine Abschätzung der Restlebensdauer auf der Basis der oben beschriebenen Ergebnisse sollte in Verbindung mit einer gründlichen Zustandsanalyse der Glocke erfolgen. Die Zustandsanalyse (z.B. mit Hilfe des Farbeindringverfahrens) ist erforderlich, um bei einem vorgesehenen Drehen eine Verschiebung bereits geschädigter Bereiche in Zonen ebenfalls hoher Beanspruchung zu vermeiden. Sichtbar geschädigte Bereiche sollten in Zonen geringerer Beanspruchung (30°-60°) gedreht werden.
- Bei historisch wertvollen Glocken sollten zur Ergänzung Dehnungsmessungen im höchstbeanspruchten Bereich während des Läutens durchgeführt werden.
- Die Ergebnisse dieser Untersuchung können auf alle Glocken übertragen werden. Voraussetzung ist jedoch ein vergleichbares Festigkeitsverhalten des Glockenmaterials und ein vergleichbares Läteregime. Bei alten Glocken ist hierzu der in der Regel höhere Bleigehalt der Bronze, der zu anderen Festigkeitseigenschaften führt, und das früher übliche Handläuten mit zum Teil hohen Schlagintensitäten und hohen Lätewinkeln, einschränkend zu berücksichtigen.
- Diese Untersuchungen haben grundlegende Erkenntnisse zur Verbesserung der Lebensdauer von Glocken erbracht. Da jede Glocke nicht zuletzt wegen der nach wie vor praktizierten Einzelfertigung ein individuelles Musikinstrument ist, sind die vorliegenden Ergebnisse bei der Projektion auf den Einzelfall entsprechend anzuwenden.

<sup>1</sup> Vorzugsweise aus Eisen oder Stahl.

<sup>2</sup> Dies trifft wohl nur auf rostanfällige Eisen-Hartguß-Glocken zu. Um die Jahrhundertwende (19-20. Jahrhundert) kam die Verwendung von Stahlguß-Glocken sehr in Mode, wobei damals als wesentlicher Vorteil gegenüber der Cu-Sn-Legierung die höhere Festigkeit hervorgehoben wurde: bei Bränden abgestürzte Stahlguß-Glocken blieben unbeschädigt. Heute hat sich der „Beratungsausschuß für das deutsche Glockenwesen“ aus „liturgischen, musikalischen, physikalischen und wirtschaftlichen Gründen gegen die Verwendung von Ersatzmetallen“ ausgesprochen.

<sup>3</sup> In der Literatur gibt es eine Untersuchung an runden, ungekerbten Probestäben aus einer Legierung mit 6.24 % Sn, 3.97% Zn, 1.97% Pb, Rest Cu, aus der die Beziehung zwischen Lastwechselanzahl N und Spannungsamplitude  $\sigma$  zu  $\log(N) = -8.95 \log(\sigma) + 25.7$  MPa abzuleiten ist.